

Reemergence of Winter SST Anomalies

著者	杉本 周作
号	50
学位授与番号	2329
URL	http://hdl.handle.net/10097/39388

氏名・(本籍)	すぎもと しゅう さく 杉 本 周 作
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2329号
学位授与年月日	平成19年3月27日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Reemergence of Winter SST Anomalies (冬季海面水温偏差の再出現現象)
論文審査委員	(主査) 教授 花 輪 公 雄 教授 川 村 宏, 境 田 清 隆 助教授 須 賀 利 雄, 木 津 昭 一

論文目次

Abstract	i
Acknowledgment	iv
Contents	vi
1. General introduction	1
1.1 Scientific background	1
1.2 Reemergence mechanism of winter sea surface temperature anomalies	2
1.3 Scope of the present dissertation	4
2. Remote reemergence areas of winter sea surface temperature anomalies in the North Pacific	8
2.1 Introduction	8
2.2 Data and method	9
2.3 Results	10
2.3.1 Detected two pairs of FA and RA	10
2.3.2 Current field in the upper ocean	11
2.3.3 Trace of temperature anomalies in the subsurface layer	12
2.3.4 Change of water properties from the formation region to the reemergence region	12
2.4 Summary and remarks	13
3. Why does not reemergence of winter sea surface temperature anomalies occur in the North Pacific eastern subtropical mode water area?	20
3.1 Introduction	20

3.2 Data and processing	22
3.3 Behaviors of winter surface temperature anomalies	24
3.3.1 Lag correlation of winter SST anomalies	24
3.3.2 Tracing of winter SST anomalies	24
3.4 Double diffusive convection in the lower portion of mode waters	25
3.5 Persistency nature of mode water properties	27
3.6 The role of warming season for an occurrence of reemergence	28
3.6.1 Stratification in the surface layer due to heat input	28
3.6.2 Strength of winter SST anomalies in mode water formation areas	29
3.7 Summary	30
 4. Impact of remote reemergence of the subtropical mode water on winter SST variation in the central North Pacific	 48
4.1 Introduction	49
4.2 Datasets and method	51
4.3 Period-dependent nature of occurrence of remote reemergence	53
4.3.1 Running correlation analysis between RA-SST and CLT	53
4.3.2 Further evidence of the period-dependent nature of remote reemergence	54
4.4 Causes of period-dependent occurrence of remote reemergence	56
4.4.1 Relationship between remote reemergence and spin-up/spin-down of the subtropical gyre	56
4.4.2 Ocean initial stratification	57
4.5 Impact of remote reemergence on winter SSTs in the central North Pacific	61
4.6 Summary	62
 5. 20-year period circulation of upper ocean heat content anomaly in the North Pacific subtropical gyre	 76
5.1 Introduction	76
5.2 Datasets and methods	78
5.3 Detection of 20-year period circulation of OHC anomalies	80
5.4 Factors controlling OHC circulation nature	82
5.4.1 Atmospheric forcing	82
5.4.2 Oceanic process	83
5.5 Supplementary evidence for OHC circulation nature in sea level variation	84
5.6 Relationships between OHC, SST and SLP fields	85
5.7 Summary and remarks	87
 6. General conclusion	 100
 References	 104

論文内容要旨

北太平洋数十年変動に代表される、大気海洋系の長周期変動の存在が各大洋で指摘されている。また、イワシ・サンマなどの漁獲量が北太平洋数十年変動の周期と一致することが報告されている。すなわち、気候変動と海洋生態系の観点から、大気海洋系の長周期変動現象の実態把握とその変動機構を明らかにすることが必要とされている。この長周期変動を駆動する機構として、これまで多くの仮説が提案されているが、定説は未だ存在しない。このような中で、「冬季海面水温偏差の再出現現象 (reemergence)」が、長周期変動の解明に迫る突破口になりうるのではないかと注目されている。ここで、再出現とは、冬季混合層内で形成された水温偏差が、薄い夏季混合層下で持続し、再び翌冬の混合層に取り込まれることで、冬季混合層内に同符号の偏差を出現させる現象である。すなわち、再出現は、記憶した過去の気候情報を未来に伝える「記憶装置」としてふるまい、長周期変動をもたらす海洋現象としての役割が期待されている。

再出現現象の理解に向けて、多くの先行研究が行われている。しかし、そのいずれもが、海流系の効果を考慮しない「定在的」な再出現を記述するに留まっている。そこで本研究は、海流系を加味することで、再出現を3次的に解釈し、その新たな可能性を提示することを目的の一つとする。また、本研究の遂行に際し、海洋観測資料が対象としている現象に対し十分な長さを準備できないなど、解析結果の信頼度が常に問題となる。これを克服するために、異なる考え方・手法を基に作成された複数の資料を用いて、同一の解析を行うことで信頼性を高め、現段階でもっとも確からしい再出現現象の描像を得ることに努めた。

第2章では、海流系の効果を加味することで、北太平洋で起こる再出現現象の3次元構造の理解を目指した。その結果、冬季に北太平洋亜熱帯モード水域（北太平洋西部）で形成された水温偏差は、夏季に亜表層を東に移動し、1年後に北太平洋中央部で海面に再出現することを見出した。この東方への移流速度は、地衡流の観点から、その妥当性が確認された。本研究では、これを「遠隔再出現 (remote reemergence)」と名付けた。すなわち、遠隔再出現は、離れた2地点の海面水温変動をつなぐ「海洋の架け橋」として作用する。大気海洋系の長周期変動に果たす遠隔再出現の役割を解明することが、研究課題として浮上する。これは第4章で追求される。

第3章では、再出現発現の必要条件を提示した。冬季海面水温偏差の再出現域は、モード水形成域と一致することが報告されている。しかし、北太平洋東部に位置する北太平洋東部亜熱帯モード水形成域は、再出現域として同定されていない。そこで本研究は、鉛直分解能が高いWOCE定線データ（2m間隔）と時間分解能が高いArgoデータ（10日間隔）を使用することで、北太平洋東部亜熱帯モード水域が非再出現域となる要因を調べた。その結果、北太平洋東部亜熱帯モード水下層部での強いsalt-finger型混合がモード水の特性を速やかに消失させる要因であることがわかった。さらに、北太平洋東部亜熱帯モード水は、その上層部での変質も著しいことを見出した。これは、暖候季における海面加熱が極端に小さく、表層で密度が十分に成層しないことによると結論付けた。最終的に、非再出現要因を理解することで、再出現発現の必要条件を次のように提案した。

- (1) 強い海面冷却により、深い冬季混合層が形成され、層厚の厚いモード水が形成されること。
- (2) 強い海面加熱により、浅い暖候季混合層が即座に形成されること。その結果、亜表層に蓄えられたモード水が大気強制から隔離される「場」が構築される。
- (3) 暖候季に、亜表層に存在するモード水が強い混合を受けないこと。

本章では、国際的に整備されつつある、時間・鉛直分解能の高い観測資料を用いることで、従来の観

測資料からは得られなかった再出現機構の実態の詳細を明らかにすることに成功した。

第4章では、74年（1930年から2003年）にわたる長期観測資料を用いて、第2章で同定した遠隔再出現の長周期変動特性を調べた。その結果、遠隔再出現の発現は、約20年周期で期間依存していることを見出した。すなわち、約10年間、遠隔再出現の発現期になると、続く約10年間は非発現期となる。この期間依存性は、北太平洋亜熱帯ジャイアのスピン・アップ/スピン・ダウン（アリューシャン低気圧の強弱）から説明された。すなわち、スピン・アップ（アリューシャン低気圧の強化）の7年後が発現期で、スピン・ダウン（アリューシャン低気圧の弱化）の7年後が非発現期であった。さらに、遠隔再出現域を含む北太平洋亜熱帯ジャイア北部領域での海洋表層貯熱量分布を調べた結果、再出現発現期には正の貯熱量偏差が分布しており、非発現期には負偏差の分布が観察された。このことは、表層貯熱量を含む海洋内部構造の変動が、遠隔再出現の発現・非発現を決定する主因の一つであることを暗に示している。つづいて、遠隔再出現の役割を定量的に明らかにするために、重回帰分析によるシンプルモデルを作成した。北太平洋中央部の海面水温偏差変動は、遠隔再出現とアリューシャン低気圧による強制を同程度に受けていることがわかった。本章の結果は、長周期変動機構の解明に不可欠な再出現現象の理解に貢献するものであるといえる。

第5章では、大気海洋系の約20年の周期的変動を理解することを目的とした。はじめに、第4章で再出現現象との因果関係が示唆された海洋表層貯熱量変動を調べた。より厳密に貯熱量変動特性をとらえるために、波の伝播成分の抽出に最適な複素主成分解析など、いくつかの統計的手法を適用した。その結果、表層貯熱量が、約20年の周期で北太平洋亜熱帯ジャイアを時計回りに循環していることを見出した。この循環の要因を調べた結果、貯熱量変動は、直上の大気強制により形成されるのではなく、移流や水温躍層深度変動を含めた海洋の役割が支配的であることがわかった。さらに、大気海洋結合系の理解を深めるために、相関解析を用いて大気と海洋が密に相互作用する海域の同定を行った。このため、次の3変数を解析対象とした：表層貯熱量（海洋表層場の変動を示す指標）・海面気圧（大気変動場の指標）・海面水温（大気と海洋の境界場としての指標）。その結果、北太平洋亜熱帯ジャイア北部領域が、3変数間の高相関領域として同定された。この結果は、北太平洋亜熱帯ジャイア北部領域が、大気海洋相互作用系の約20年の周期的変動を理解する上での重要海域であることを示す有力な証拠である。

北太平洋亜熱帯ジャイアの北部領域では、海面水温場と海面気圧場のいずれもが約20年の周期で変動することが報告されている。さらに、貯熱量も同じ周期で変動していることを、第5章で指摘した。また、この海域は、第2章と第4章で同定された遠隔再出現域と一致する。すなわち、本研究で扱った再出現現象こそが、大気海洋系の長周期変動の理解、および、長周期変動に果たす海洋の役割を解明する上で重要な機構であるといえる。今後の研究課題は、遠隔再出現と貯熱量循環を加味して、20年周期変動の総合的なシナリオを構築することである。そのためには、黒潮を含めた海流系の役割を定量的に議論し、亜熱帯ジャイアのスピン・アップ/スピン・ダウン構造を詳細に理解する必要がある。

論文審査の結果の要旨

再出現現象とは、冬季混合層内で形成された水温偏差が、夏季に薄い混合層下で持続し、翌冬、再び混合層に取り込まれて同符号の偏差が出現する現象を指す。杉本周作提出の博士論文は、北太平洋を対象海域とし、この「再出現現象」を包括的に扱ったものである。

再出現現象についての過去の研究は、海水の動きを考慮しない「定在型」再出現の記述に留まってきた。本研究では、海流系を考慮した再出現域同定の解析方法を新に考案し、適用した結果、亜熱帯モード水域で形成された冬季水温偏差が、夏季に亜表層を東に移動し、1年後に中央部で海面に再出現すること、すなわち「遠隔型」再出現を見出した。

ほとんどのモード水は再出現するが、東部亜熱帯モード水は再出現しない。この要因を調べた結果、このモード水下部で強いソルトフィンガー型混合が起こること、さらにこの海域は暖候季の海面加熱が極端に小さく、表層の密度成層が弱いことからモード水上層部での変質も著しいことで、偏差が速やかに消失されることを見出した。

さらに、過去74年間の長期観測資料を用いて、遠隔再出現の長周期変動特性を調べた。その結果、約10年間の遠隔再出現の発現期の後、続く約10年間は非発現期となる、約20年周期の期間依存性を見出した。この期間依存性は、亜熱帯循環系のスピン・アップ/スピン・ダウン、すなわち、アリューシャン低気圧の活動度から説明されることがわかった。さらに、亜熱帯循環系北部での海洋表層貯熱量を調べたところ、(非)再出現発現期には正(負)の貯熱量偏差が観察された。これは、表層貯熱量を含む海洋内部構造の変動が、遠隔再出現の発現・非発現を決定する主因の一つであることを示す。また、中央部の海面水温偏差変動に及ぼす遠隔再出現の役割を重回帰モデルで調べた結果、遠隔再出現とアリューシャン低気圧による直接の強制が同程度に効いていることを見出した。

最後に、複素主成分解析などの統計的手法により、海洋表層貯熱量の時間・空間変動を調べ、貯熱量偏差が約20年の周期で亜熱帯循環系を時計回りに循環していることを見出した。この変動は、直上の大気強制により形成されるのではなく、水塊の移流や水温躍層深度の変動を含めた海洋の過程が担っていることがわかった。

以上、杉本周作提出の博士論文は、再出現現象に関する多くの新知見を得ており、本人が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、杉本周作提出の博士論文は、博士(理学)の学位論文として合格と認める。